

## **ТРЕХФАЗНЫЙ МГД – НАСОС ТАНДЕМ**

Рассмотрено МГД-течение металлического расплава в МГД-канале безобмоточного насоса [1-5]. Анализ проводится для плоского линейного канала одной фазы трехфазного насоса (или для канала однофазного насоса). В соответствии с рисунком 1 плоский линейный МГД-канал расположен в декартовой прямоугольной системе координат XYZ.

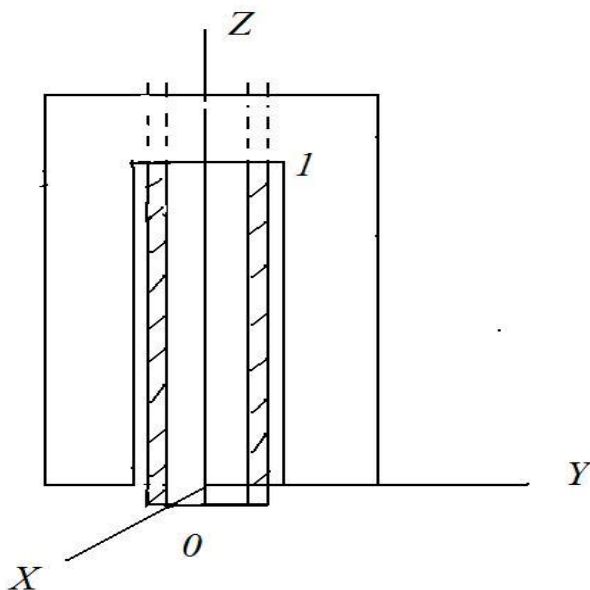


Рис. 1. Фаза трехфазного канала в системе координат XYZ

По каналу с металлическим расплавом течет переменный ток в направлении координаты X; этот ток наводится в канале посредством индуцированного электрического поля, обусловленного как изменяющимся во времени магнитным полем стороннего источника (трансформатора), так и движением в продольном направлении (по координате Z) металлического расплава в магнитном поле с индукцией, направленной в канале по координате Y, создаваемой переменным электрическим током, текущим по каналу. Металлический расплав подводится входным патрубком к активной зоне канала ( $Z=0$ ), течет по каналу по координате Z, отводится от активной зоны канала ( $Z=1$ ) выходным патрубком. МГД-канал из немагнитного материала (нержавеющей стали) расположен в пазу П-образного магнитопровода между полюсами, магнитно замкнутыми на выходе канала ( $Z=1$ ) ярмом. За базисную величину индукции принимается индукция насыщения материала магнитопровода; за базисную величину длины МГД-канала – глубина паза П-образного магнитопровода; другие базисы принимаются в соответствии с разделом 1.3 [4]. Анализируется режим работы МГД-канала, когда протекающий по каналу переменный ток создает наибольшую по условиям насыщения магнитопровода на входе в канал ( $Z=0$ ) индукцию  $B_0=1$ . На дне паза ( $Z=1$ ) на выходе из канала индукция принимает нулевое значение  $B_1=0$ , если выполняется допущение, что магнитная проницаемость стали во много раз больше магнитной проницаемости металлического расплава. Чтобы не получить противо-

давление от выходной части канала также желательно, чтобы индукция на дне паза магнитопровода принимала нулевое значение [4]. На входе в канал действует только сторонняя компонента электрического поля, поэтому при  $Z=0$   $E_0=0$ . При этих граничных условиях решается система уравнений (1.1-1.12) МГД-течения металлического расплава в электромагнитном поле [4], определяются постоянные интегрирования, находятся характеристики МГД-канала, в частности зависимости индукции, плотности тока, плотности электромагнитных сил, перепада электромагнитного давления от глубины паза (координаты  $Z$ ) и влияющих параметров: магнитного числа Рейнольдса

$$R_m = \mu_0 \sigma L \bar{u} \quad \text{и относительной длины канала} \quad \lambda = \frac{L}{\sqrt{\frac{2}{\mu_0 \sigma \omega}}} = L_{\text{отн}}. \text{ Анализ зависимостей}$$

показывает следующие особенности МГД-канала безобмоточного насоса (при относительной длине канала или относительной глубине паза магнитопровода равной  $L_{\text{отн}} = 2,5$ ). Индукция, наибольшая на входе в канал  $B_0=1$ , наименьшая на выходе из канала  $B_1=0$ , при увеличении магнитного числа Рейнольдса  $R_m$  (увеличении скорости потока металлического расплава) сносится потоком на глубину паза магнитопровода в соответствии с рисунком 2. Аналогично распределена плотность электрического тока в соответствии с рисунком 3, а также плотность электромагнитных сил в соответствии с рисунком 4. Электромагнитный напор, создаваемый всем каналом, является постоянной величиной (что определяется граничными условиями на входе и выходе канала), однако вклад в этот напор различных частей канала меняется: при малых магнитных числах Рейнольдса  $R_m$  напор создается входной частью канала, при больших магнитных числах Рейнольдса  $R_m$  – напор равномерно создается по всей глубине паза в соответствии с рисунком 5. Механическая мощность канала в зависимости от  $R_m$  увеличивается от нуля, достигает максимума, затем асимптотически приближается к нулю. С увеличением  $L_{\text{отн}}$  экстремум мощности сдвигается в сторону больших  $R_m$  и соответствует безразмерному параметру

$$G=v (\sigma/f)^{0,5} = 2,7 \times 10^3,$$

где  $v$  – скорость металлического расплава, м/с,

$\sigma$ – удельная электропроводность, См/м,

$f$  – частота, Гц.

Коэффициент полезного действия  $\eta_K = \frac{P_{\Pi}}{P}$ . при реальном параметре – относительной длине канала  $L_{\text{отн}} = 2,5$  с достаточной для практики точностью рассчитывается по формулам

$$\eta_K = \frac{P_{\Pi}}{P} = 0,12 R_m \quad \text{при} \quad 0 \leq R_m \leq 3,$$

$$\eta_K = \frac{P_{\Pi}}{P} = 0,021 R_m + 0,285 \quad \text{при} \quad 3 \leq R_m \leq 10.$$

Зависимость коэффициента мощности от магнитного числа Рейнольдса  $R_m$  с достаточной для практики точностью определяется формулой  $\text{Cosf} = 0,7 + 0,02R_m$ .

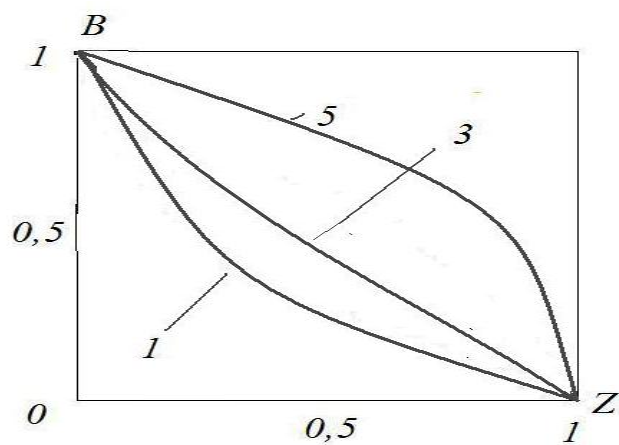


Рис.2. Зависимость индукции от глубины паза  $Z$  и магнитного числа Рейнольдса  $R_m$

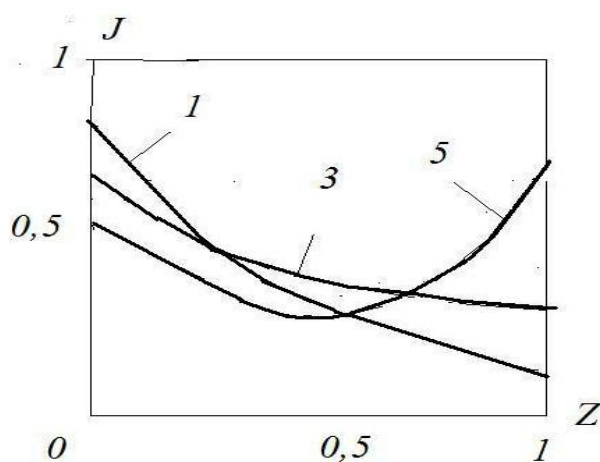


Рис. 3. Зависимость плотности тока в канале от глубины паза  $Z$  и магнитного числа Рейнольдса  $R_m$

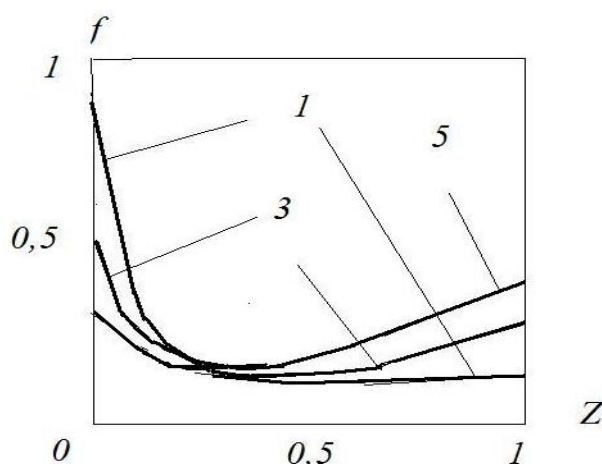


Рис. 4. Зависимость плотности электромагнитных сил в канале от глубины паза  $Z$  и магнитного числа Рейнольдса  $R_m$

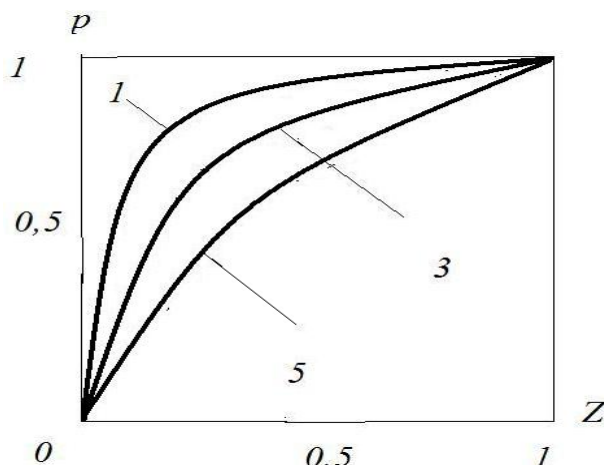


Рис. 5. Зависимость перепада давления от глубины паза  $Z$  и магнитного числа Рейнольдса  $R_m$

Таким образом, на основании математической модели получено для плоского линейного МГД-канала (или фазы трехфазного МГД-канала) безобмоточного электромагнитного насоса распределение по глубине паза  $\Pi$  – образного магнитопровода (длине канала) индукции, плотности электрического тока, плотности электромагнитных сил, электромагнитного напора, выполнен анализ механической мощности, коэффициента полезного действия, коэффициента мощности.

#### Список использованных источников

1. Смолин Г.К. Высокотемпературный МГД-насос // Проблемы электроэнергетики, машиностроения и образования: сб. науч. тр. / под редакцией Г.К. Смолина. Екатеринбург: Рос. гос. проф.-пед. ун-т, 2005. С. 22-43.
2. Смолин Г.К. МГД-устройства для обработки расплавленного металла // Проблемы электроэнергетики, информатики и образования: сб. науч. тр. / под редакцией Г.К. Смолина. Екатеринбург: Рос. гос. проф.-пед. ун-т, 2009. С. 69 - 80.
3. Смолин Г.К. Трехфазный безобмоточный МГД-насос «Тандем» // Проблемы электроэнергетики, информатики и образования: сб. науч. тр. / под редакцией Г.К. Смолина. Екатеринбург: Рос. гос. проф.-пед. ун-т, 2010. С. 55 – 58.
4. Разработка основ теории, методики расчета нового электромагнитного насоса "Тандем" для жидких металлов и исследование его параметров и характеристик (заключительный отчет о НИР) Отчет о НИР ФГАОУ ВО РГППУ, Руководитель Г.К.Смолин. № госрегистрации 01201170836. Екатеринбург, 2015. 100 с.
5. Смолин Г.К., Шабалдин Е.Д. Линейно-вихревые и трансформаторные МГД-устройства / Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике: материалы 1 Международной научно-технической конференции . Пермь, 24-25 сентября 2015 г. Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2015. С.216-223.